中国区域气候干湿与土壤湿度变化特征及其差异性分析

李春华[1]， 朱 飙[2,3]， 杨金虎[3,4]， 刘晨汐[2,3]， 段欣妤[2,3]， 黄鹏程[2,3]

（1. 兰州资源环境职业技术大学，甘肃 兰州 730021；2. 兰州区域气候中心，甘肃 兰州 730020；3. 甘肃省气象局，甘肃 兰州 730020；4. 中国气象局兰州干旱气象研究所/中国气象局干旱气候与减灾重点实验室/甘肃省干旱气候与减灾重点实验室，甘肃 兰州 730020）

摘 要： 气候干湿是表征气候特征的重要指标，土壤干湿是一个复杂的、多维的水文气候概念，二者有其差异性，也有一定一致性。在全球变暖背景下，有必要进一步深入研究二者演变趋势与差异。鉴于此，对中国气候干湿与土壤干湿变化特征及其差异进行分析，明确气候干湿与土壤干湿的异同。采用湿润度指数对中国气候干湿整体状况及区划情况进行研究，并对同时段土壤干湿趋势进行分析。研究表明：(1) 近60余年中国不同气候区分界线未发生明显变化，但不同的气候态与1961—1990年气候态时段相比，中国北方自西向东存在一个面积广大的气候变干带，其湿润度指数存在着轻微变小的趋势，只是变化程度尚未达到改变气候分类的程度。(2) 中国不同气候区气候干湿与土壤干湿在年内变化有所差异，湿润区与半湿润区二者一致性明显好于半干旱和干旱区；不同气候区潜在蒸散与降水差值的月变化存在明显差异，对干旱与半干旱区而言，3—9月与3—6月为气候干期，该时段干旱发生的可能较大；半湿润气候区7—8月进入水分盈余阶段，而湿润气候区，除个别月份，全年基本处于水分盈余状态。(3) 中国区域气候干湿变化与土壤湿度多年变化存在着明显的差异，不同气候区多年湿润度指数均呈轻微增加趋势，但土壤湿度大部呈变干趋势，侧面说明中国不同气候区农牧业生产潜在干旱风险在增高。研究结果有助于全面认识气象干湿与土壤干湿，促进对二者关联的进一步研究；同时有助于加强干旱风险的防控意识，提高农牧业生产的抗旱应对举措。

关 键 词： 气候干湿；土壤湿度；变化特征；差异性；中国

文章编号： 1000－6060(2024)10－1674－14(1674～1687)

气候干湿状况及其长期变化趋势一直以来是气候研究的课题之一，对认识气候问题具有重要意义，同时对于生态环境和社会经济相关研究也具有重要参考价值。自1992年Hulme等[1]以降水与潜在蒸散的比值定义湿润度指数评估全球旱地变化情况以来，气候干湿有了具体指标，长期以来围绕湿润度指数开展了一系列的研究，主要聚焦全球变暖背景下，气候干湿边界的演变情况以及未来全球气候干湿变化趋势问题[2-6]。就全国范围而言，张存杰等[7]对中国气候干湿区划指标、潜在蒸散计算方法、气候区划标准等方面的研究进展进行了全面的总结与回顾，并给出了各气候区划的面积占比。苑全治等[8]研究发现，中国气候干湿变化趋势区域差异明显，但线性趋势大多不显著。李宗梅等[9]研究发现中国气候总体上趋向于干旱，尤以东北地区最为严重，仅北疆地区趋向于湿润。高艳红等[10]以干燥度指数、帕尔默指数和400 mm等降水量线3种干湿指标，研究了中国气候干湿界线变迁并发现西段有湿化趋势。同时，张强等[11]和乔梁等[12]对中国气候干湿分界的夏季风过渡区进行了深入的研究，指出该区域气候干湿受夏季风活动影响显著，其气候干湿与夏季风强、弱直接对应。

收稿日期： 2023-11-23； **修订日期：** 2024-02-23

基金项目： 国家自然科学基金项目(42375039，42230611)；中国气象局兰州干旱研究所干旱气象科学研究基金项目(IAM202208)资助

作者简介： 李春华(1973-)，女，副教授，主要从事气象教学与研究. E-mail：Lch1908@lzre.edu.cn

通讯作者： 朱飙(1972-)，男，正研级高工，主要从事气候变化研究. E-mail：zhubiaolz@sohu.com

另一方面，研究表明土壤湿度在气候变化中的作用仅次于海温，在陆地上，其作用甚至超过海温[13]。鉴于土壤湿度能够通过改变地表的反照率、热容量、大气感热和潜热影响大气与气候[13]以至于影响降水[14]，同时影响地表能量和水分平衡[15-17]，不少学者关注土壤湿度气候学，并开展了诸多研究[18-22]。张人禾等[18]研究发现，中国土壤湿度整体上呈变干趋势，东北和南方地区比中纬度地区变干趋势更显著，并且深层土壤变干较浅层土壤显著；左志燕等[19]研究也获得了类似的结论，发现中国西南地区土壤从浅层到深层都存在一致的变干趋势，东部地区春季土壤呈不同程度的干旱化现象；郭维栋等[20]通过分析中国东北、华北和西北东部3个地区土壤湿度的年代际演变特征，发现中国北方秋季土壤存在干旱化趋势；张秀芝等[21]给出了中国0~100 cm深度土壤湿度的区域特征和垂直分布变化；李明星等[23]选取评估后的11个全球耦合气候模式模拟的土壤湿度资料，分析发现未来中国典型干旱区土壤湿度呈增加趋势，湿润区变化不显著，干湿过渡带土壤湿度变化最剧烈，呈显著干旱化趋势。

上述研究均取得了显著的成果，但由于气候干湿侧重于气象方面，土壤干湿虽然对气候变化有显著作用，但更侧重于农业方面，二者虽密切相关，但依然存在着显著的差异。目前最新研究认为，虽然干旱与旱地都对应气候干燥、植被稀少和水资源短缺，但陆地干旱是一个复杂的、多维的水文气候概念，而干旱指数是对大气干旱度的衡量，在气候影响研究中需区别使用干旱和旱地的概念[24]。有研究发现，在21世纪，温带旱地可能会收缩转化为亚热带旱地，在植被因适应气候变化蒸腾作用加剧的情况下，深层土壤可能会越来越干燥[25]。因此，有必要针对中国气候干湿与土壤干湿进行对比研究，分析二者变化特征差异，明确其变化趋势。鉴于此，本文利用湿润度指数对中国气候干湿整体状况及区划变化情况进行研究，并对同时段土壤干湿趋势进行分析，以引起大家对中国气候干湿与土壤干湿差异与成因研究的重视。

1 资料与方法

1.1 资料

（1）本文资料来源于中国气象局气象信息中心。选用中国区域336个气象站的日气象资料，要素包括最高气温、最低气温、平均风速、日照时数、相对湿度以及降水，时段为1961—2022年。选用标准为该台站上述要素每年缺测次数均小于等于3次。对于缺测资料采用前后2 d进行插补，连续缺测采用等线性方法插补。资料采用文献[26-27]中的方法进行质量控制。

（2）采用相同时段ERA再分析0~7 cm、7~28 cm、28~100 cm、100~289 cm深度土壤含水量月值数据，该数据经过统一的同化处理。使用中通过双线性插值到对应的气象站点。根据Liu等[28]与张人禾等[18]对多种再分析土壤资料误差的对比分析，均表明ERA土壤湿度在量值上最接近观测值，而参与对比的CFSR、NCEP、JRA、MERRA数据的量值误差则依次次之，因此本文采用ERA再分析土壤资料。

（3）我国部分农业气象站1992—2012年的土钻土壤测墒资料。

1.2 方法

1.2.1 湿润度指数（HI） Hulme等[1]1992年为评估全球气候干湿状况，以降水与潜在蒸散的比值定义了该指数，见式（1），广泛应用于气候变化研究[7-9,29]。

$$\mathrm{HI} = P/\mathrm{PET} \quad (1)$$

式中：HI为湿润度指数；P和PET分别为年降水量和年潜在蒸发量（mm）。依据湿润度指数可将气候区划分为极端干旱区（HI < 0.03）、干旱区（0.03≤HI < 0.2）、半干旱区（0.2≤HI < 0.5）、半湿润区（0.5≤HI < 1.0）及湿润区（HI≥1.0）5种类型[1]。

1.2.2 潜在蒸散 采用FAO Penman-Monteith公式计算[30]，该公式全面考虑了各气象要素对潜在蒸散的影响，理论意义明确，适用于不同气候类型，目前已被广泛认可并作为标准[31]，见式（2）[32]：

$$\mathrm{PET} = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_{ave} + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (2)$$

式中：PET为潜在蒸散量（mm·d^{-1}）；Δ为饱和水汽压斜率；R_n为净辐射（MJ·m^{-2}·d^{-1}）；G为土壤热通量（MJ·m^{-2}·d^{-1}）；γ为干湿表常数（kPa·℃$^{-1}$）；T_{ave}为日最高和最低气温相加后的平均值（℃）；u_2为2 m高度风速值（m·s^{-1}）；e_s和e_a分别为饱和水汽压和实际水汽压（kPa）。计算中月土壤热通量G可由式（3）来估算。

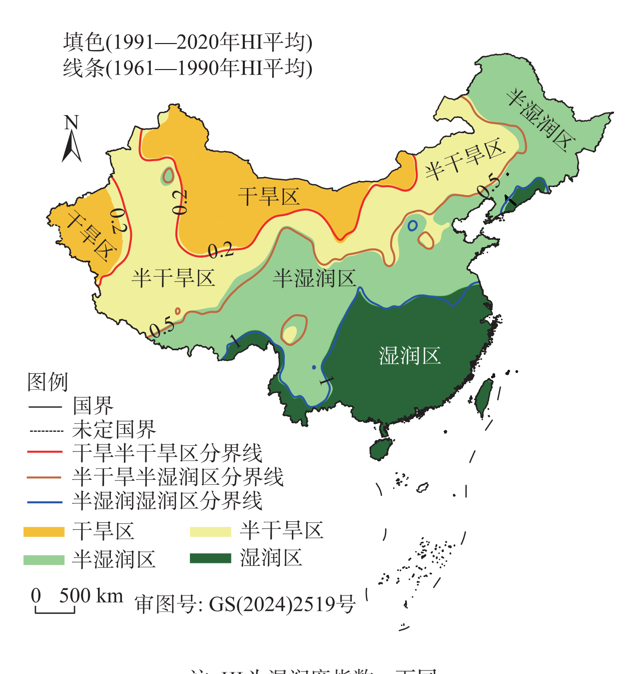
$$G = 0.14 \times (T_{month,i} - T_{month,i-1}) \quad (3)$$

式中：$T_{month,i}$ 与 $T_{month,i-1}$ 分别为第 i 月与第 i-1月的月平均气温(℃)。

2 结果与分析

2.1 中国区域气候干湿基本特征

2.1.1 基于湿润度指数的中国区域气候区划分与变化 以中国1961—1990年与1991—2020年2个气候态HI的变化来看，60 a来，中国气候干湿界限变化不明显，最近气候态(1991—2020年)的气候分区(填色)与1961—1990年气候态的气候分区(线条)几乎重合(图1)。说明以HI指数来衡量，60 a内中国气候干湿分区并未发生明显变化，仅在个别地方，有小范围的差异，如新疆西部干旱区东边缘线收缩；河北南部的半干旱区在1991—2020年扩大，与北部的半干旱区合并；西南部闭合的半干旱区面积变小；1991—2020年气候态对应的湿润区东部有小段较1961—1990年偏北。既然中国区域干湿界限空间态在60 a内变化不明显，那么各气候区不同时段干湿变化如何？接下来进行分析。



注：HI为湿润度指数。下同。

图1 基于HI的中国区域气候分区

Fig. 1 Regional climate zoning in China based on humidity index

2.1.2 中国区域不同气候区HI时间变化趋势 中国不同气候区多年来HI均有轻微的上升趋势(图2)，其中湿润区上升最明显，其次是半干旱气候区和半湿润气候区，二者HI上升趋势非常接近，干旱气候区HI上升趋势在量级上最小。虽然中国不同气候区HI上升趋势轻微，气候倾向率只有0.003·$(10a)^{-1}$、0.005·$(10a)^{-1}$、0.005·$(10a)^{-1}$和0.007·$(10a)^{-1}$，但由于HI本身量值就很小，因此这一变化趋势对不同气候区气候干湿程度的影响显然不能忽视。干旱与半干旱区气候趋势系数通过了信度为α=0.1的t检验，半湿润与湿润区未能通过检验。

2.1.3 中国区域HI及影响因子空间变化 虽然图1显示中国区域2个气候态时段气候分区基本不变，但不同区域的HI并非一成不变，只是变化程度尚未达到改变气候分类的程度。1991—2020年与1961—1990年平均湿润度的差值显示，在中国北方自西向东存在一个明显的气候变干带(图3a黄色区域)，范围包括中国新疆东部与甘肃西部少部分区域，甘肃黄河以东、宁夏、陕西、山西大部、京津冀、山东东部、辽宁西南部、内蒙古东部、重庆、河南、湖北北部、云南大部、海南、广东大部。这些区域虽然各自的气候分区类型没有发生变化，但存在着HI变小的趋势[此气候变干带，在1971—2000年与1961—1990年、1981—2010年与1961—1990年HI气候态差值图中均有显示(图略)，只是边界范围稍有差异，整体覆盖面积相当]。中国其余区域2个气候态HI之差则表现为增大(图3a绿色区域)，表明这些区域在气候类型不变的前提下，有轻微的变湿倾向。

鉴于HI的变化与降水和潜在蒸散二者有直接的关系，下面就HI以及与其直接相关的降水量、潜在蒸散在1991—2020年和1961—1990年2个气候态时段的变化进行分析。对中国区域2个气候态降水进行对比，以2个气候态降水变化百分率来表征。可以看出，干旱区、半干旱区站点虽然稀疏，但基本表现出降水增加的趋势，最近一个气候态降水增加幅度较1961—1990年气候态在25%以内，干旱区西部的新疆西部、北部个别站点，降水增加达到25%~50%，增幅明显，虽然该区域降水增加明显，但是由于降水基数小，并不能改变其干旱缺水的基本气候格局[33]；湿润气候区绝大部分表现出明显的降水增加趋势，增幅较1961—1990年气候态大部在25%以内，云南南部、广西、广东两省部分地方降水有明显的减少趋势，这与近些年西南地区干旱多发相一致[34-35]；最值得注意的是半湿润气候区，除东北东部、山东大部降水呈明显的增加趋势外，该区域

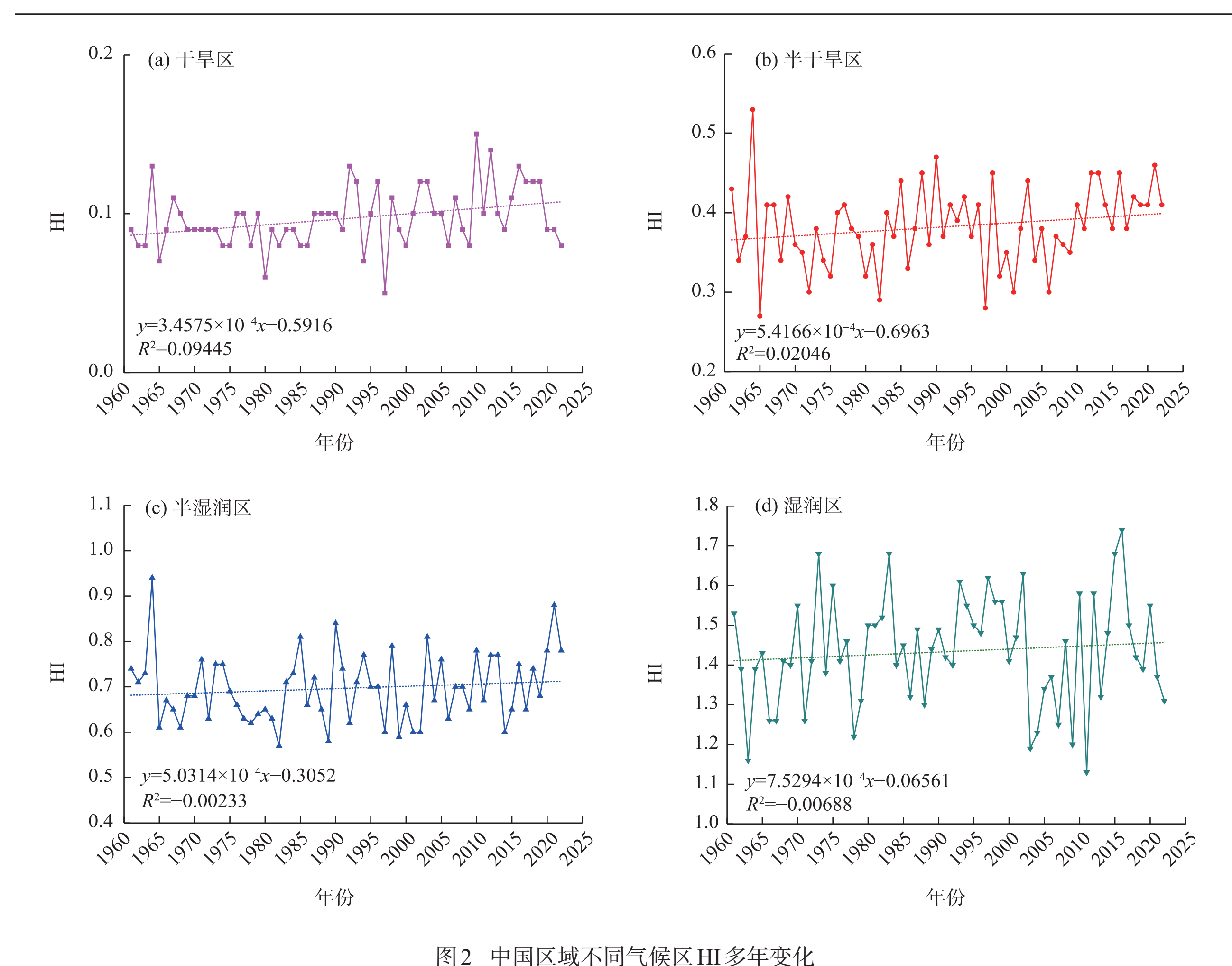
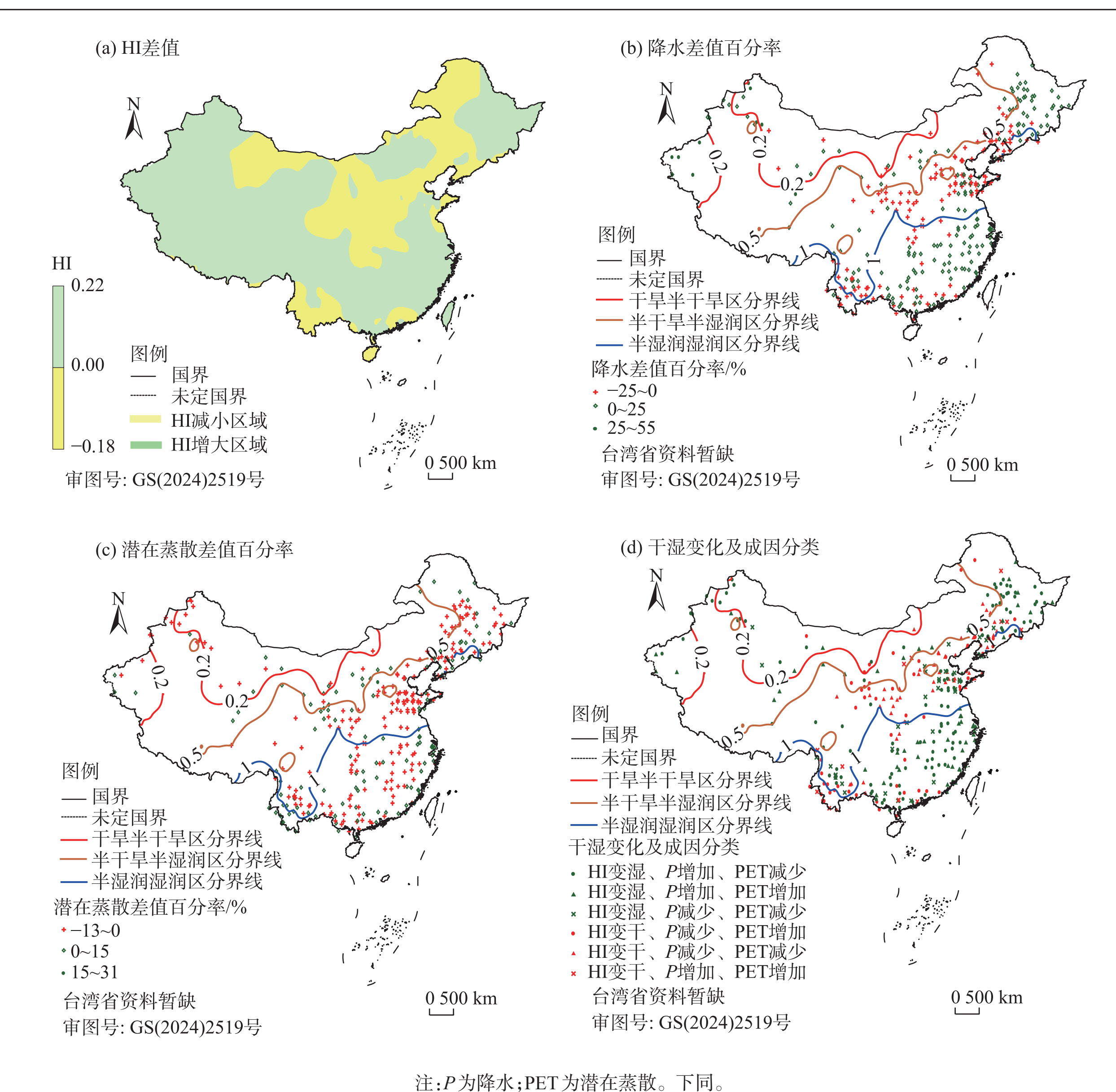


图2 中国区域不同气候区HI多年变化

Fig. 2 Multi-year variation of humidity index in different climate zones in China

从中国西南至我国中东部，大部分表现出明显的降水减少趋势，减少的幅度在25%以内（图3b）。随后对中国1991—2020年和1961—1990年2个气候态潜在蒸散变化率比较发现（图3c），潜在蒸散的变化幅度在-13%~31%之间，远小于降水-25%~55%的变化范围。同时，潜在蒸散的变化较降水变化规律性更不明显，大致而言，干旱气候区潜在蒸散较多的呈减少趋势，有利于该地区气候相对变湿；在半干旱气候区，潜在蒸散轻微增加，增加的幅度在15%以内，不利于该地区变湿；在半湿润区，大部潜在蒸散呈明显减少，包括东北东部，因此，对东北东部而言，降水增加，潜在蒸散减少，可以断定该地区变湿，而半湿润气候区的其余地方，由于降水减少，潜在蒸散减少，对于气候干湿的变化必须看二者的相对变化确定；对于湿润气候区，潜在蒸散增加与减少交杂，无明显分布规律。由于降水与潜在蒸散的相对变化决定了气候干湿的变化，因此，最后为进一步明确中国区域气候干湿变化及对应的降水和潜在蒸散变化，对于研究站点，分别判断其1991—2020年与1961—1990年2个气候态的降水和潜在蒸散的增减变化及相对变化程度，结合湿润度指数的增减，给出了相应的分类（图3d）。在图3d中，以不同的颜色表示干湿变化，其中绿色表示变湿，红色表示变干，不同的标志显示对应的降水与潜在蒸散变化。对于干旱气候区（红色线条内），主要是1类变湿，即降水增加，潜在蒸散减少；半干旱气候区规律不明显，半湿润气候区的东北东部、山东半岛、云南北部以1类为主，东北南部、陕西南部、甘肃东部以4类为主，即降水减少、潜在蒸散增加。为更明确地展示结果，将变化分类情况及对应站点占比列表如下（表1）。由表可见，变湿的站点接近研究站点的2/3，变干的占1/3略多。在变湿的站点中，降水增加、潜在蒸散减少的站点占比最高，占所有站点的35.7%，明显高于因降水增加大于潜在蒸散增加以及降水减少小于潜在蒸散减少而变湿的站点；在变干的站点中，降水减少、潜在蒸散增加而变



注：P为降水；PET为潜在蒸散。下同。

图3 1991—2020年与1961—1990年中国区域气候态对比

Fig. 3 Comparison of climate states of China during 1991—2020 and 1961—1990

表1 中国区域HI变化及干湿变化站点占比与成因归类

Tab. 1 Variation of humidity index and the proportion of dry and wet variation sites in China and classification of causes

干湿变化	降水	潜在蒸散	湿润度指数	站点数(占比/%)
变湿(63.4%)	增加	减少	增大	120(35.7)
	增加	增加，但降水增加更多	增大	59(17.6)
	减少	减少更多	增大	34(10.1)
变干(36.6%)	减少	增加	减小	62(18.5)
	减少	减少，但减少不及降水	减小	49(14.6)
	增加	增加更多	减小	12(3.6)

干的站点，降水减少大于潜在蒸散减少而变干的站点，二者占比较接近，而降水增加，但潜在蒸散增加更明显导致气候变干的站点非常少，明显少于其他两类，只占整个站点的3.6%。

2.2 中国土壤湿度变化特征

目前研究表明，气候干湿与土壤湿度二者之间存在互馈关系，互相影响[18,23]。在前述中国不同气候区干湿变化特征下，土壤湿度如何变化，二者特征是否一致？对此做出进一步分析。在使用ERA再分析土壤湿度数据前，与选取的1992—2011年中国不同气候区农业气象观测代表站的实测土壤湿度进行对比。经比对(图4)，2种资料线性关系较

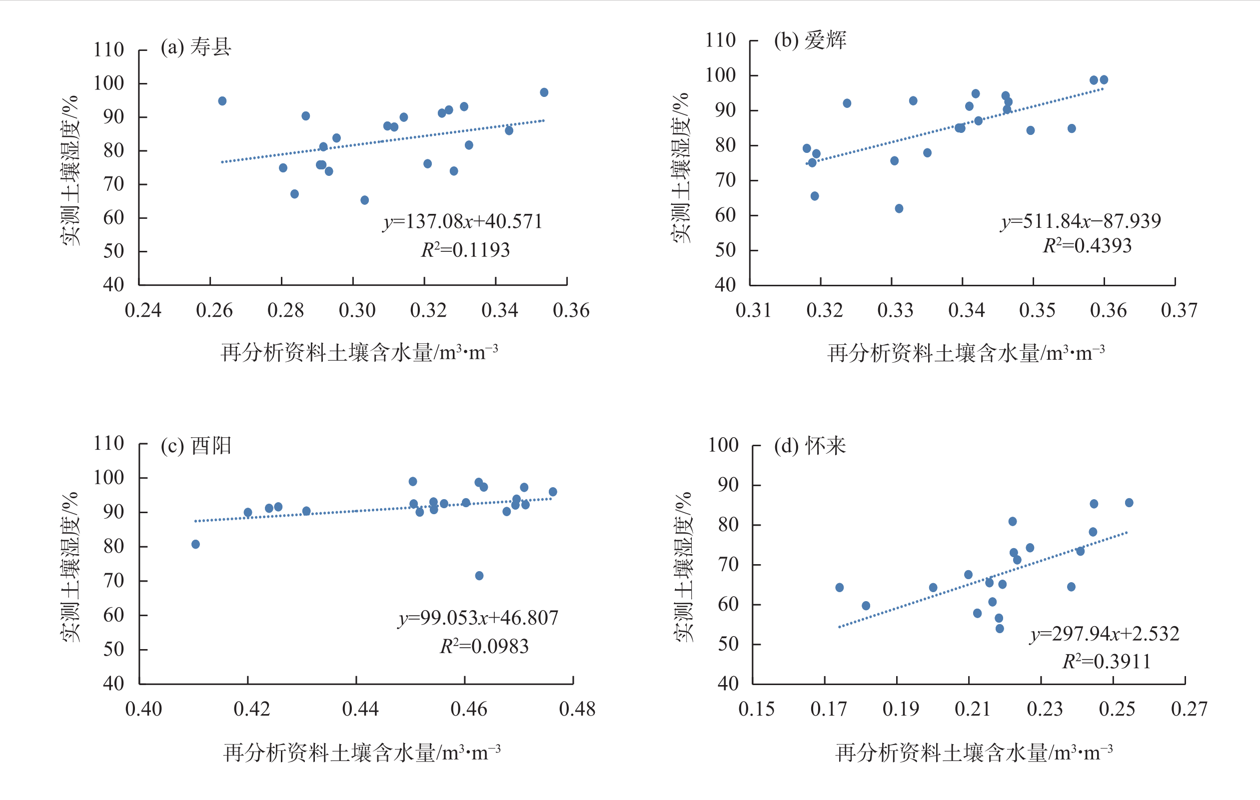


图4　中国区域不同气候区代表站点实测土壤湿度与再分析资料土壤含水量对比

Fig. 4　Comparison between measured soil moisture and reanalyzed soil water content at representative sites in different climate zones in China

好，以寿县、爱辉、酉阳、怀来4个代表站为例，再分析土壤湿度与实测土壤含水百分率相关系数分别为0.35、0.66、0.31、0.63，均通过了α=0.2的显著性检验，结合他人研究结论[18-19,23]，再分析土壤湿度资料在趋势分析中有较好的可信度。这与王爱慧等[36]对中国陆地水分收支进行研究时，对该资料的准确性分析结果相一致。

2.2.1　土壤湿度的变化趋势　对中国1961—2022年0~7 cm、7~28 cm、28~100 cm、100~289 cm深度土壤湿度气候趋势进行分析，其空间分布表明(图5)，中国区域不同深度的4层土壤湿度主要均呈一致的变干趋势，其中0~7 cm、7~28 cm变干趋势最明显，除个别区域湿度增大外，其余区域气候趋势系数一致为负，表明土壤湿度一致变小(图5a~b)；28~100 cm、100~289 cm深度层土壤湿度气候趋势系数与1、2层略有不同，其中第3层在西北地区、四川省以及东北东部表现为变湿(图5c)，第4层在西北地区大部与四川省表现为变湿，其余地区气候趋势系数一致为负(图5d)。总体看，近60余年来，中国范围大部土壤湿度逐步减小，尤其是浅层土壤，变干趋势更明显。采用t检验，第4层通过显著性检验的站点达一半以上，为54.3%，其余1~3层通过显著性检验的站点分别为16.7%、14.6%和18.3%，通过率并不高。

为进一步明确中国不同区域近60余年来土壤湿度增减状况，将1~3层土壤湿度平均后，用1991—2020年与1961—1990年2个气候态相减(图6a)，同样也对第4层土壤湿度进行相减(图6b)，可见，在中国西北地区大部，土壤湿度气候态差值显示土壤湿度均出现轻微增加，第4层土壤湿度增加较1~3层平均明显，这一区域主要位于中国干旱气候区(图1)；而东北东部地区相反，1~3层平均增湿较第4层明显。

2.2.2　中国区域不同气候区土壤湿度的时间变化　对4层土壤湿度进行平均，并分不同气候区分析其多年变化趋势(图7)。由图可见，干旱气候区土壤湿度在1961—1980年呈明显增加趋势，随后的几十年土壤湿度几乎未发生变化，受1961—1980年这一时段的增加影响，导致其线性趋势呈上升趋势，但并不能代表该气候区近40 a的实际土壤湿度变化趋势；而其余的半干旱、半湿润、湿润气候区均呈现一致的变干趋势，其中以半湿润气候区变干最明显。气候倾向率分别是−0.38、−0.62、−0.63、−0.48，均通过了α=0.01

(a) 0~7 cm土壤湿度气候趋势系数

图例
国界
未定国界
气候趋势系数
−0.41~−0.25
−0.25~0.00
0.00~0.27
0 500 km
审图号: GS(2024)2519号

(b) 7~28 cm土壤湿度气候趋势系数

图例
国界
未定国界
气候趋势系数
−0.56~−0.25
−0.25~0.00
0.00~0.35
0 500 km
审图号: GS(2024)2519号

(c) 28~100 cm土壤湿度气候趋势系数

图例
国界
未定国界
气候趋势系数
−0.58~−0.30
−0.30~0.00
0.00~0.35
0.35~0.69
0 500 km
审图号: GS(2024)2519号

(d) 100~289 cm土壤湿度气候趋势系数

图例
国界
未定国界
气候趋势系数
−0.88~−0.60
−0.60~−0.30
−0.30~0.00
0.00~0.30
0.30~0.60
0.60~0.92
0 500 km
审图号: GS(2024)2519号

图5 中国区域不同深度土壤湿度气候趋势系数

Fig. 5 Climatic trend coefficient of soil moisture at different depths in China

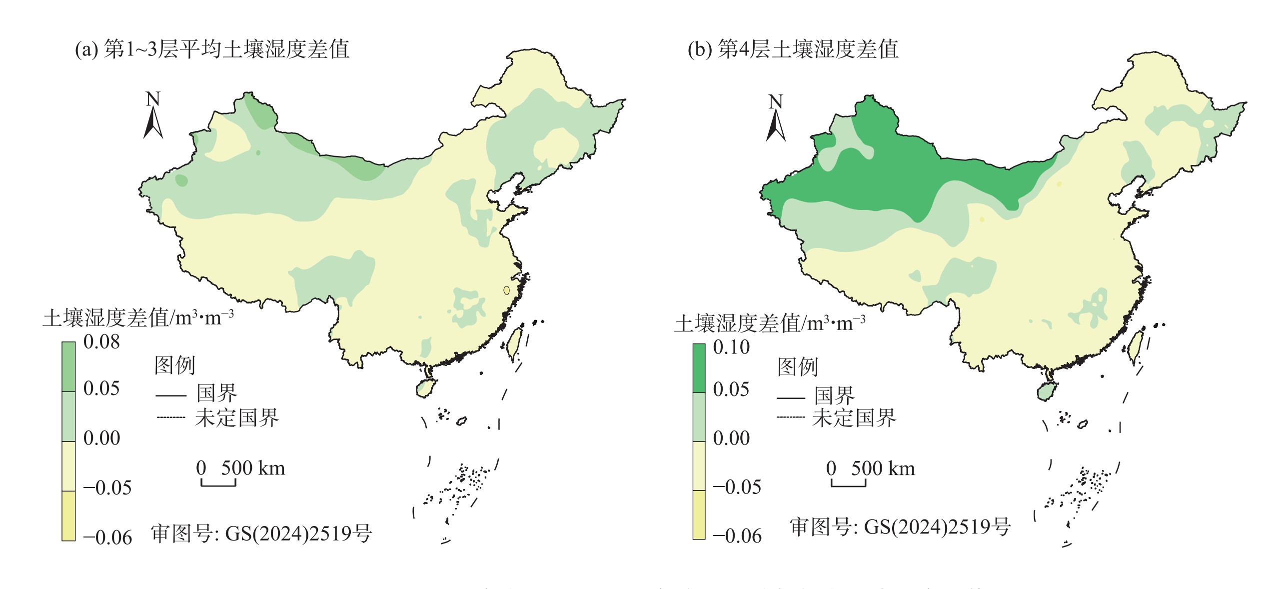


图6 1991—2020年与1961—1990年中国区域气候态土壤湿度差值

Fig. 6 Difference of soil moisture during 1991—2020 and 1961—1990 in China

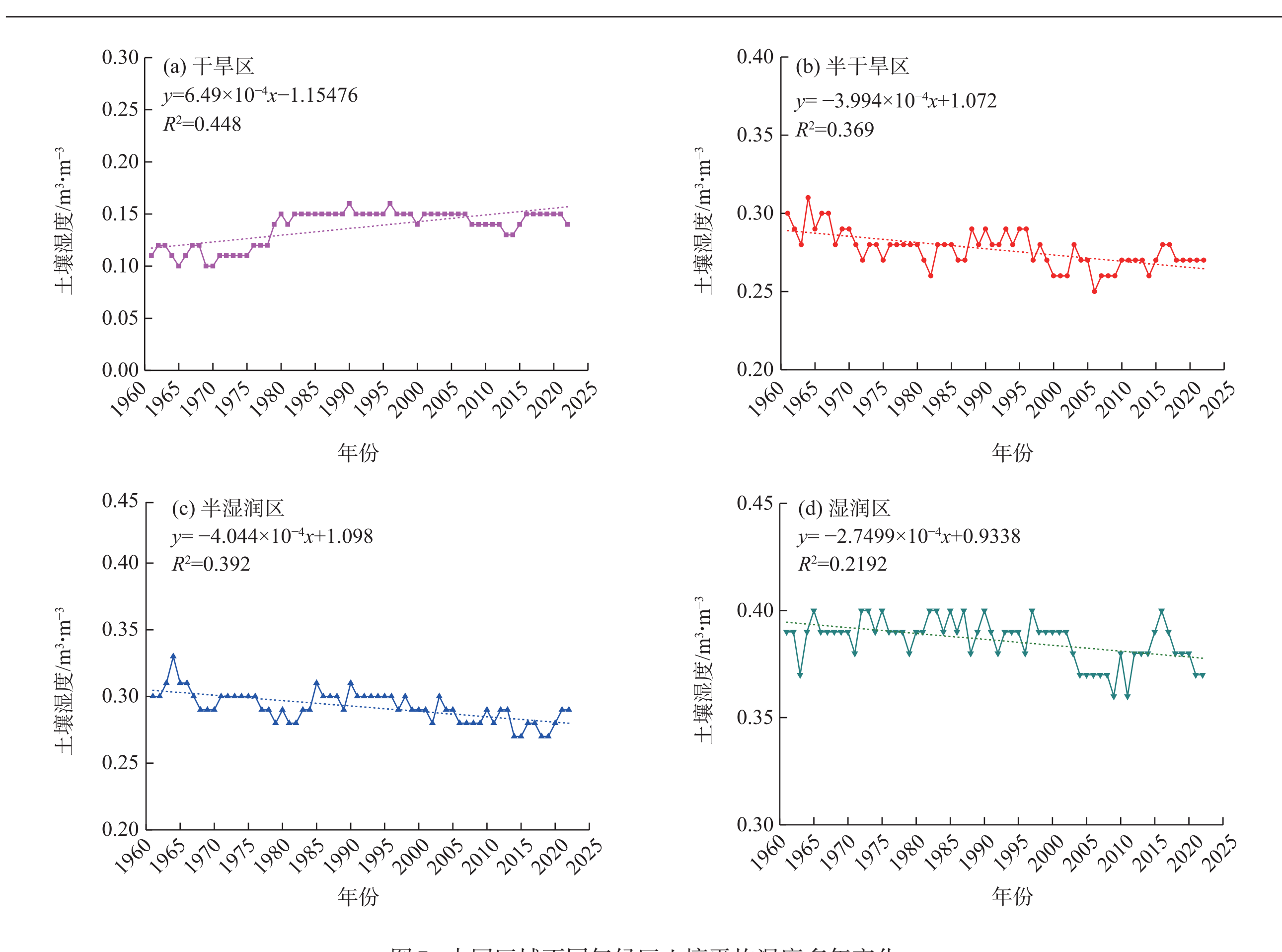


图7　中国区域不同气候区土壤平均湿度多年变化

Fig. 7　Multi-year variation of average soil moisture in different climate zones in China

的信度检验(由于干旱区在1980年存在突变,因而其气候倾向率自1980年起算,其余起算均为1961年)。

2.3　中国气候干湿与土壤湿度变化特征对比

2.3.1　中国区域不同气候区HI与土壤湿度年内变化　前述分析,中国不同气候区HI与土壤湿度空间变化与多年变化并不一致。由于中国不同气候区主要降水时段存在明显差异,年内气候干湿差异很大,土壤湿度也与降水时段对应,发生较大变化。那么,对于中国不同气候区,气候干湿与土壤湿度年内变化特征如何?降水集中期对气候干湿与土壤湿度影响是否一致?接下来进行分析。

由图8可见,中国不同气候区HI与不同深度土壤湿度的变化差异。对于干旱区而言,0~7 cm和7~28 cm土壤湿度变化明显,28~100 cm土壤湿度略有波动,最深的100~289 cm土壤湿度全年几乎没有变化,并且28~100 cm层土壤湿度较最深层的土壤湿度大,说明在干旱区,深层土壤水分一直未得到有效补充,这与其他气候区明显不同;且1~2层土壤湿度在4—8月与HI变化较一致(图8a)。在半干旱区,除最深的第4层土壤湿度几乎全年不变外,1~3层土壤湿度年内变化均很明显,最深的第4层土壤湿度在4—8月已经大于浅层土壤湿度,说明在半干旱区,深层土壤水分在某些时段得到一定补充。该气候区1~3层土壤湿度自6月起与HI变化较一致(图8b)。在半湿润与湿润气候区,HI与土壤湿度的变化更加一致,同时湿润区最深层土壤湿度最大,而半湿润区在7—9月,浅层土壤水分补给更充足,土壤湿度大于深层土壤(图8c~d)。

2.3.2　中国区域不同气候区潜在蒸散与降水月差值变化　在中国不同气候区年内哪些月份有水分盈余,则对应时段土壤易于获得水分补充。降水大于潜在蒸散时段,易于土壤蓄水。因此,进一步对中国不同气候区潜在蒸散与降水差值的年内变化进行分析。对干旱气候区而言,其一年之中潜在蒸发减去降水均为正值,差值呈逐步增大至峰值后再逐步减小,增大时段主要自3月起,二者差值接近70 mm,4—8月差值快速增大,均大于110 mm,9月逐步减少,回落至100 mm以下(图9a),说明干

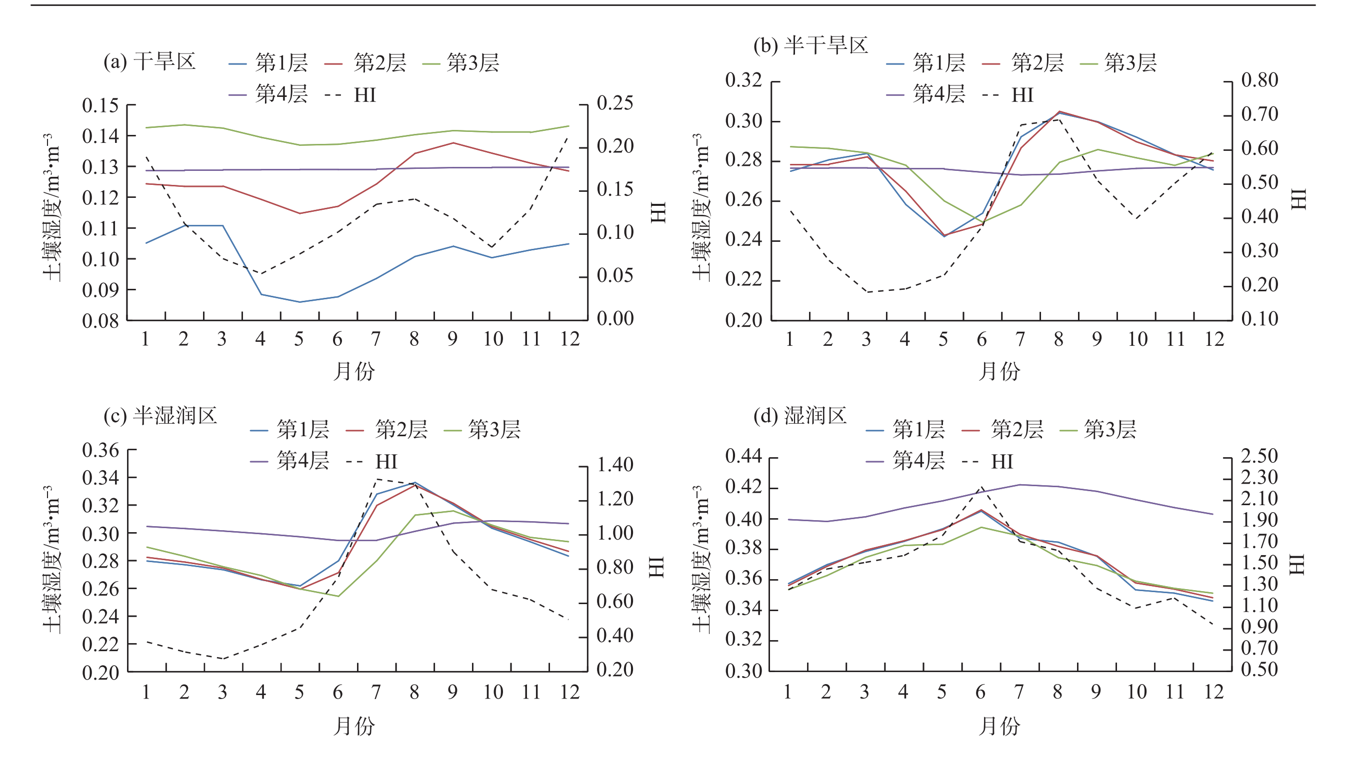


图8　中国区域不同气候区HI与土壤湿度年内变化对比

Fig. 8　Comparison of annual variation in humidity index and soil moisture in different climate zones in China

旱气候区的主要蒸发时段为3—9月，蒸发大造成该时段干旱发生的可能较大，这与此气候区从春至夏各时段干旱均易发生的规律相对应。同时，干旱气候区长期处于能量主导状态，在一年大部分时段中，降水始终小于潜在蒸散。对于半干旱气候区而言，潜在蒸发与降水差值在3—6月快速增大，5月达到最大，超过110 mm，6月其差值开始回落，但依然较大，表明该气候区干旱易发生的主要时段在3—6月，与干旱气候区时间差异明显，7—10月二者差值较稳定，在40~60 mm之间（图9b）。干旱与半干旱气候区一年之中潜在蒸散和降水差值出现时间上存在明显差异，这与已有研究结果一致[37]。对于半湿润气候区，1—6月潜在蒸散均大于降水，随着7—8月降雨集中期的到来，降水大于潜在蒸散，进入水分盈余阶段，随后的9—12月，潜在蒸散与降水非常接近，差值基本保持在约20 mm（图9c）；对于湿润气候区，除个别月份，全年潜在蒸散均小于降水，尤其是4—8月，潜在蒸散明显小于降水，水分一直处于盈余状态，6月两者差值最大，达120 mm以上（图9d）。半湿润气候区与湿润气候区潜在蒸散与降水差值在年内变化上也存在明显差异，半湿润气候区年内变化呈明显上升-下降-上升的波浪形变化，湿润气候区年内变化呈明显的下降-上升V字形变化。对比图8与图9，在不同气候区，潜在蒸发与降水差值变化趋势与HI的年内变化大致呈相反态势。图9箱线图中，最上面与下面的短横分别对应最大、最小值，箱线中间的线是平均值，箱线的上、下边界分别代表75%与25%排位。

比较中国区域不同气候区土壤湿度多年变化（图7）与HI多年变化（图2）可见，除干旱气候区在研究时段的1961—1980年之间，土壤湿度增加外，其余气候区土壤湿度均减小，与近60余年不同气候区的HI均呈增加有着明显的差异，这是中国区域气候干湿与土壤干湿变化明显的不同点之一。

2.3.3　中国区域HI与土壤湿度气候趋势系数差异对比　为进一步比较中国气候干湿与土壤湿度变化的差异情况，绘制了中国区域不同气候区HI与0~7 cm、7~28 cm、28~100 cm、100~289 cm深度土壤湿度气候趋势系数百分率图（图10），由图可见，中国不同气候区土壤湿度气候趋势系数主要以负值为主（图10中绿线左侧），呈现较明显的变干趋势，1~4层土壤湿度变干站点分别占到分析站点的96.5%、93.2%、78.4%、90.3%。中国不同气候区HI气候趋势系数大部分位于绿线右侧，主要呈正的趋

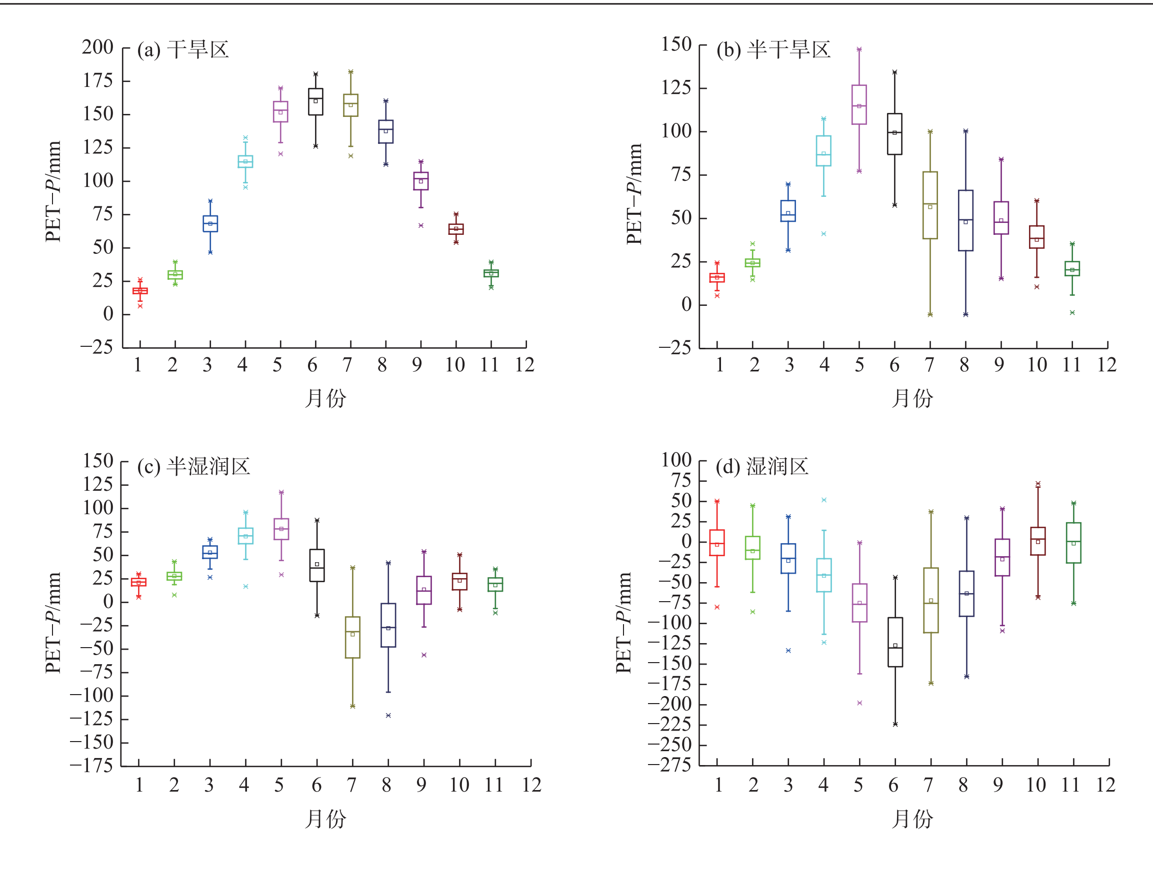


图9　中国区域不同气候区潜在蒸散与降水月差值变化

Fig. 9　Monthly difference of PET and precipitation in different climate zones in China

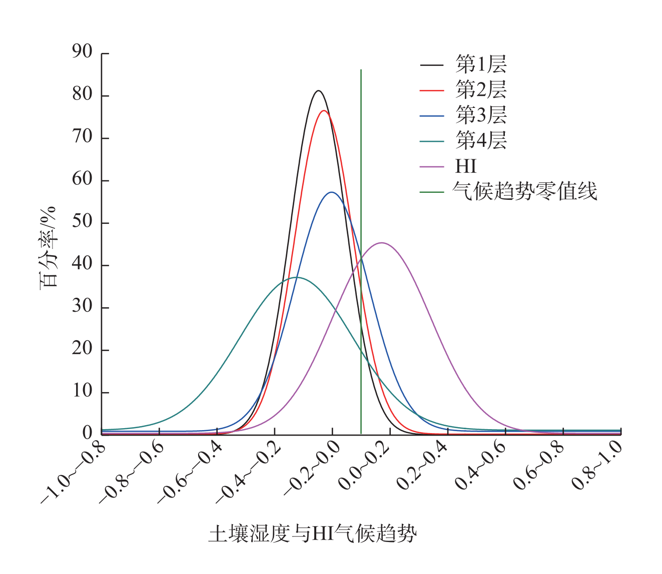


图10　中国土壤湿度与HI气候趋势系数百分率分布

Fig. 10　Distribution of climatic trend coefficients of humidity index and soil moisture in China

势（变湿站点占64.6%，变干占35.4%），与土壤湿度气候趋势系数有明显差异，这是中国区域气候干湿与土壤干湿变化明显的另一不同点。

可见，对中国区域而言，尽管大部区域气候有轻微变湿趋势，但与土壤湿度变化趋势并不完全一致，二者并不完全对应。长期看，不同深度的土壤几乎一致呈变干趋势，这进一步说明气候干湿与土壤干湿有着本质不同，气候变湿并不意味着土壤变湿，二者差异与水循环过程、地表能量、植被作用影响有关[17,38]，相互之间存在着明显的不对应关系。图10一方面反映出在中国区域气候干湿与土壤湿度变化的差异，另一方面表明中国农牧业生产存在的潜在干旱风险变高，这与他人前期用农业受旱资料研究得到的“中国除个别地方，农业干旱都在加重”这一结论相对应[39]。

3　讨 论

全球气候变暖已促使地表蒸散发增大，水循环过程加强，大气环流调整已超出现有认知[40]。从上述分析可见，气候干湿与土壤干湿差异性明显，二者受多种因素影响，变化原因复杂。因此，厘清两者的差异，尤其是内在联系与影响将是今后重要的科学研究课题之一。目前而言，需要强化以下几点

认识:(1) 充分重视气候干湿与土壤干湿的差异性。(2) 强化气候变暖背景下水循环过程研究,深入认识气象干湿与土壤干湿相互关联影响的机理。(3) 鉴于分析发现土壤逐步变干,因此需推广适应性农业技术,合理规划农牧业布局,提高农牧业生产的抗旱能力,加强风险防控意识,力争未雨绸缪。(4) 加强水资源管理,推广节水技术,提高水资源的利用效率。此外,本文仅对中国气候干湿与土壤干湿变化差异特征进行分析,尚未就二者之间的定量化联系和各气象要素对潜在蒸散的量化影响以及由此造成的气候干湿变化进行精确分析,后续将进一步深化研究,并结合水循环和丁一汇等[41]指出的影响中国气候的大气环流及海洋因子,如东亚夏季风、太平洋振荡(PDO)、印度洋海盆模态(IOBM)、大西洋多年代际振荡(AMO)等进行多因子关联研究,以更全面理解中国气候干湿与土壤干湿变化的差异。

4 结 论

本文通过对中国区域气候干湿与土壤湿度变化特征及差异性分析,主要得到以下结论:

(1) 近60余年,中国气候干湿与土壤湿度多年变化存在明显差异,大部分区域气候HI增加,而土壤湿度变干,尤其是浅层土壤变干趋势明显,侧面说明中国不同气候区农牧业生产干旱潜在风险在增高。

(2) 从HI看,在60 a内中国区域不同气候区分界线未发生明显变化,因此,即便是在气候变暖的背景下,HI作为气候干湿指标依然稳定少变,对于气候分区依然实用,不能一概否定。

(3) 虽然中国区域不同气候区边界稳定少变,但1971—2000年、1981—2010年、1991—2020年不同气候态与1961—1990年气候态对比发现,在中国北方自西向东存在一个面积广大的气候变干带,这一气候变干带边界范围有所差异,整体覆盖面积相当,其HI存在着变小的趋势,只是变化程度尚未达到改变气候区分类的程度。

(4) 通过对降水和潜在蒸散增减与对应的HI变化的简要归因分类,发现在中国区域,降水增加对应潜在蒸散减少以及降水增加大于潜在蒸散增加造成的变湿是主要变湿原因,占研究站点的53.3%;降水减少对应潜在蒸散增加以及潜在蒸散增加大于降水增加造成的变干是主要变干原因,占研究站点33.1%。

(5) 中国区域不同气候区气候干湿与土壤干湿在年内变化有所差异,湿润区与半干湿区二者一致性明显好于半干旱和干旱区。潜在蒸散与降水差值的月变化存在明显差异,对于旱区和半干旱区而言,3—9月和3—6月为气候干期,该时段发生干旱的可能较大;半湿润气候区7—8月进入水分盈余阶段;湿润气候区,除个别月份,全年一直处于水分盈余状态。半湿润气候区潜在蒸散与降水差值年内变化呈明显上升-下降-上升的波浪形变化,湿润气候区年内变化呈明显的下降-上升V字形变化。

参考文献(References)

[1] Hulme M, Marsh R, Jones P D. Global changes in a humidity index between 1931-60 and 1961-90[J]. Climate Research, 1992(2): 1-22.

[2] Greve P, Orlowsky B, Mueller B, et al. Global assessment of trends in wetting and drying over land[J]. Nature Geoscience, 2014(7): 716-721.

[3] Huang J P, Yu H P, Dai A G, et al. Drylands face potential threat under 2 degrees C global warming target[J]. Nature Climate Change, 2017, 7(6): 417-425.

[4] Huang J P, Yu H P, Guan X D, et al. Accelerated dryland expansion under climate change[J]. Nature Climate Change, 2016(6): 166-172.

[5] Huang J P, Ji M X, Xie Y K, et al. Global semi-arid climate change over last 60 years[J]. Climate Dynamics, 2016, 46(3-4): 1131-1150.

[6] 陈亚宁, 李玉朋, 李稚, 等. 全球气候变化对干旱区影响分析[J]. 地球科学进展, 2022, 37(2): 111-119. [Chen Yaning, Li Yupeng, Li Zhi, et al. Analysis of the impact of global climate change on dryland areas[J]. Advances in Earth Science, 2022, 37(2): 111-119.]

[7] 张存杰, 廖要明, 段居琦, 等. 我国干湿气候区划研究进展[J]. 气候变化研究进展, 2016, 12(4): 261-267. [Zhang Cunjie, Liao Xiaoming, Duan Juqi, et al. The progresses of dry-wet climate divisional research in China[J]. Climate Change Research, 2016, 12(4): 261-267.]

[8] 苑全治, 吴绍洪, 戴尔阜, 等. 1961—2015年中国气候干湿状况的时空分异[J]. 中国科学(地球科学), 2017, 47(11): 1339-1348. [Yuan Quanzhi, Wu Shaohong, Dai Erfu, et al. Spatio-temporal variation of the wet-dry conditions from 1961 to 2015 in China[J]. Science China: Earth Sciences, 2017, 47(11): 1339-1348.]

[9] 李宗梅, 张增祥, 赵晓丽, 等. 全国干湿分布区动态变化研究[J]. 地球与环境, 2017, 45(4): 420-433. [Li Zongmei, Zhang Zengxiang, Zhao Xiaoli, et al. Changes of distribution of arid and humid areas in China[J]. Earth and Environment, 2017, 45(4): 420-433.]

[10] 高艳红, 许建伟, 张萌, 等. 中国400 mm等降水量变迁与干湿变

化研究进展[J]. 地球科学进展, 2020, 35(11): 1101-1112. [Gao Yanhong, Xu Jianwei, Zhang Meng, et al. Advances in the study of the 400 mm isohyet migrations and wetness and dryness changes on the Chinese Mainland[J]. Advances in Earth Science, 2020, 35(11): 1101-1112.]

[11] 张强, 岳平, 张良, 等. 夏季风过渡区的陆-气相互作用: 述评与展望[J]. 气象学报, 2019, 77(4): 758-773. [Zhang Qiang, Yue Ping, Zhang Liang, et al. Land-atmosphere interaction over the summer monsoon transition zone in China: A review and prospects[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2019, 77(4): 758-773.]

[12] 乔梁, 张强, 岳平, 等. 由非季风区向季风区过渡过程中大气边界层结构的变化分析[J]. 大气科学, 2019, 43(2): 251-265. [Qiao Liang, Zhang Qiang, Yue Ping, et al. Analysis of changes in the structure of atmospheric boundary layer from non-monsoon zone to monsoon zone[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2019, 43(2): 251-265.]

[13] 马柱国, 符淙斌, 谢力, 等. 土壤湿度和气候变化关系研究中的某些问题[J]. 地球科学进展, 2001, 16(4): 563-568. [Ma Zhuguo, Fu Congbin, Xie Li, et al. Some problems in the study on the relationship between soil moisture and climatic change[J]. Advance in Earth Science, 2001, 16(4): 563-568.]

[14] 刘文丽, 陈樟, 赵勇, 等. 中亚5月土壤湿度异常对6月降水的影响[J]. 干旱区地理, 2024, 47(1): 38-47. [Liu Wenli, Chen Zhang, Zhao Yong, et al. Influences of soil moisture anomalies in May on June precipitation in Central Asia[J]. Arid Land Geography, 2024, 47(1): 38-47.]

[15] Zhang Q, Wang S, Wang S S, et al. Influence factors and variation characteristics of water vapor absorption by soil in semi-arid region [J]. Science China Earth Sciences, 2016(59): 2240-2251.

[16] 姜萍, 胡列群, 许婷婷. 近60 a新疆大气水分亏缺的时空变化特征[J]. 干旱区地理, 2023, 46(1): 1-10. [Jiang Ping, Hu Liequn, Xu Tingting. Spatiotemporal variations of vapor pressure deficit in Xinjiang in recent 60 years[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(1): 1-10.]

[17] 高晓宇, 郝海超, 张雪琪, 等. 中国西北干旱区植被水分利用效率变化对气象要素的响应——以新疆为例[J]. 干旱区地理, 2023, 46(7): 1111-1120. [Gao Xiaoyu, Hao Haichao, Zhang Xueqi, et al. Responses of vegetation water use efficiency to meteorological factors in arid areas of northwest China: A case of Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(7): 1111-1120.]

[18] 张人禾, 刘栗, 左志燕. 中国土壤湿度的变异及其对中国气候的影响[J]. 自然杂志, 2016, 38(5): 313-319. [Zhang Renhe, Liu Li, Zuo Zhiyan. Variations of soil moisture over China and their influences on Chinese climate[J]. Chinese Journal of Nature, 2016, 38(5): 313-319.]

[19] 左志燕, 张人禾. 中国东部春季土壤湿度的时空变化特征[J]. 中国科学(地球科学), 2008, 38(11): 1428-1437. [Zuo Zhiyan, Zhang Renhe. Spatio-temporal variation of spring soil moisture in eastern China[J]. Science China: Earth Sciences, 2008, 38(11): 1428-1437.]

[20] 郭维栋, 马柱国, 姚永红. 近50年中国北方土壤湿度的区域演变特征[J]. 地理学报, 2003, 58(增刊1): 83-90. [Guo Weidong, Ma Zhuguo, Yao Yonghong. Regional characteristics of soil moisture evolution in northern China over recent 50 years[J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(Suppl. 1): 83-90.]

[21] 张秀芝, 吴迅英, 何金海. 中国土壤湿度的垂直变化特征[J]. 气象学报, 2004, 62(1): 51-61. [Zhang Xiuzhi, Wu Xunying, He Jinhai. Vertical variation characteristics of soil moisture in China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2004, 62(1): 51-61.]

[22] 王磊, 文军, 韦志刚, 等. 中国西北区西部土壤湿度及其气候响应[J]. 高原气象, 2008, 27(6): 1257-1266. [Wang Lei, Wen Jun, Wei Zhigang, et al. Soil moisture over the west of northwest China and its response to climate[J]. Plateau Meteorology, 2008, 27(6): 1257-1266.]

[23] 李明星, 马柱国. 中国气候干湿变化及气候带边界演变: 以集成土壤湿度为指标[J]. 科学通报, 2012, 57(28-29): 2740-2754. [Li Mingxing, Ma Zhuguo. Soil moisture-based study of the variability of dry-wet climate and climate zones in China[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(28-29): 2740-2754.]

[24] Berg A, McColl K A. No projected global drylands expansion under greenhouse warming[J]. Nature Climate Change, 2021(11): 331-337.

[25] Schlaepfer D R, Bradford J B, Lauenroth W K, et al. Climate change reduces extent of temperate drylands and intensifies drought in deep soils[J]. Nature Communications, 2017(8): 14196, doi: 10.1038/ncomms14196.

[26] 李庆祥, 董文杰, 李伟, 等. 近百年中国气温变化中的不确定性估计[J]. 科学通报, 2010, 55(16): 1544-1554. [Li Qingxiang, Dong Wenjie, Li Wei, et al. Assessment of the uncertainties in temperature change in China during the last century[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(16): 1544-1554.]

[27] 杨溯, 李庆祥. 中国降水量序列均一性分析方法及数据集更新完善[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(4): 276-281. [Yang Su, Li Qingxiang. Improvement in homogeneity analysis method and update of China precipitation data[J]. Climate Change Research, 2014, 10(4): 276-281.]

[28] Liu L, Zhang R H, Zuo Z Y. Inter comparison of spring soil moisture among multiple reanalysis data sets over eastern China[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2014(119): 54-64.

[29] 马柱国, 符淙斌, 杨庆, 等. 关于我国北方干旱化及其转折性变化[J]. 大气科学, 2018, 42(4): 951-961. [Ma Zhuguo, Fu Congbin, Yang Qing, et al. Drying trend in northern China and its shift during 1951—2016[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2018, 42(4): 951-961.]

[30] Richard G A, Luis S P, Dirk R, et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements: FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.

[31] Richard G A, William O P, James L W, et al. A recommendation

on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ET_0 by the FAO56 Penman-Monteith method[J]. Agricultural Water Management, 2006(81): 1−22.

[32] GB/T 20481−2017. 中华人民共和国国家标准: 气象干旱等级[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017. [GB/T 20481−2017. National Standard of the People's Republic of China: Classification of meteorological drought[S]. Beijing: Sandards Press of China, 2017.]

[33] 张强. 科学看待西北地区气候暖湿化现象[N]. 中国气象报, 2020−01−15(3). [Zhang Qiang. A scientific view of the phenomenon of climate warming and humidification in northwest China[N]. China Meteorological News, 2020−01−15(3).]

[34] 李韵婕, 任福民, 李忆平, 等. 1960—2010年中国西南地区区域性气象干旱事件的特征分析[J]. 气象学报, 2014, 72(2): 266−276. [Li Yunjie, Ren Fumin, Li Yiping, et al. A study of the characteristics of the southwestern China regional meteorological drought events during 1960—2020[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2014, 72(2): 266−276.]

[35] 韩兰英, 张强, 姚玉璧, 等. 近60年中国西南地区干旱灾害规律与成因[J]. 地理学报, 2014, 69(5): 632−639. [Han Lanying, Zhang Qiang, Yao Yubi, et al. Characteristics and origins of drought disasters in southwest China in nearly 60 years[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(5): 632−639.]

[36] 王爱慧, 缪月, 陈玥. 1961—2016年中国西北地区陆地水分收支的年代际变化特征[J]. 大气科学学报, 2020, 43(6): 953−966. [Wang Aihui, Miao Yue, Chen Yue. Interdecadal variation of land water budget in northwest China from 1961 to 2016[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2020, 43(6): 953−966.]

[37] 朱飙, 张强, 李春华, 等. 我国干旱半干旱区气候变化特征及其对干湿波动的影响[J]. 大气科学学报, 2023, 46(1): 42−54. [Zhu Biao, Zhang Qiang, Li Chunhua, et al. Characteristics of climate change in arid and semi-arid areas of China and its influence on climatic dry-wet fluctuation[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2023, 46(1): 42−54.]

[38] 张强, 张良, 黄菁, 等. 我国黄土高原地区陆面能量的空间分布规律及其与气候环境的关系[J]. 中国科学(地球科学), 2014, 44(9): 2062−2076. [Zhang Qiang, Zhang Liang, Huang Jing, et al. Spatial distribution of surface energy fluxes over the Loess Plateau in China and its relationship with climate and the environment[J]. Science China: Earth Sciences, 2014, 44(9): 2062−2076.]

[39] 赵海燕, 张强, 高歌, 等. 中国1951—2007年农业干旱的特征分析[J]. 自然灾害学报, 2010, 19(4): 201−206. [Zhao Haiyan, Zhang Qiang, Gao Ge, et al. Characteristic analysis of agricultural drought disaster in China during 1951—2007[J]. Journal of Natural Disasters, 2010, 19(4): 201−206.]

[40] 张强, 杨金虎, 王朋岭, 等. 西北地区气候暖湿化的研究进展与展望[J]. 科学通报, 2023, 68(14): 1814−1828. [Zhang Qiang, Yang Jinhu, Wang Pengling, et al. Progress and prospect on climate warming and humidification in northwest China[J]. Chinese Science Bulletin, 2023, 68(14): 1814−1828.]

[41] 丁一汇, 李怡, 王遵娅, 等. 亚非夏季风的年代际变化: 大西洋多年代际振荡与太平洋年代际振荡的协同作用[J]. 大气科学学报, 2020, 43(1): 20−32. [Ding Yihui, Li Yi, Wang Zunya, et al. Interdecadal variation of Afro-Asian summer monsoon: Coordinated effects of AMO and PDO oceanic modes[J]. Transations of Atmospheric Sciences, 2020, 43(1): 20−32.]

Difference of changing characteristics analysis between climate dry-wet and soil moisture in China

LI Chunhua[1], ZHU Biao[2,3], YANG Jinhu[3,4], LIU Chenxi[2,3],
DUAN Xinyu[2,3], HUANG Pengcheng[2,3]

(1. Lanzhou Resources & Environment Voc-Tech University, Lanzhou 730021, Gansu, China; 2. Lanzhou Regional Climate Center, Lanzhou 730020, Gansu, China; 3. Gansu Province Meterology Bureau, Lanzhou 730020, Gansu, China; 4. Institute of Arid Meteorology, CMA, Lanzhou, Key Open Laboratory of Arid Climate Change and Disaster Reduction of CMA, Key Laboratory of Arid Climate Change and Reducing Disaster of Gansu Province, Lanzhou 730020, Gansu, China)

Abstract: Climatic dry-wet conditions are important indicators of climate characteristics, whereas soil dry-wet conditions are complex and multidimensional hydroclimatic concepts. There are significant differences and certain consistencies between these conditions. Under the background of global warming, the evolution trends and differences of these conditions must be further studied. Thus, this paper analyzed the characteristics and differences of climate dry-wet and soil moisture conditions in China and clarified their similarities and differences. Therefore, the overall climate dry-wet status and regional fluctuation were studied using the humidity index, and the soil dry-wet trends were analyzed in the same period. The results showed little change in the boundary line of different climates in China over the past 60 years. However, compared with the climate state period from 1961 to 1990, there was a vast climate drying zone from west to east in the north of China and its humidity index had a slightly decreasing trend, but the variation did not necessitate changing the climate classification. The monthly variations of climate dry-wet and soil dry-wet conditions were different in each climate zone in China, and the consistencies of humid and semihumid zones were better than those of semiarid and arid zones. The monthly variations of PET and precipitation differences in each climatic region in China were obviously different. For arid and semiarid regions, March-September and March-June were dry periods, respectively, and drought was more likely to occur in these periods. The semihumid climate area entered the water surplus stage from July to August, whereas the humid climate area, except for a few months, was basically in the water surplus state throughout the year. There were obvious differences between climate dry-wet changes and perennial soil moisture changes in China's land regions. The annual humidity index in different climate regions showed a slightly increasing trend, but most of the soil moisture showed a drying trend, especially the shallow soil in the plough layer, which showed a potentially increasing agricultural and pastoral drought risk in different climate regions of China. The results of this study can help us fully understand the relationship between climate dry-wet and soil dry-wet conditions and promote further studies on their relationships. Moreover, this study can strengthen the awareness of drought risk prevention and control and improve agricultural and pastoral drought resistance measures.

Key words: climate dry-wet; soil moisture; change characteristics; difference; China